

# Une nouvelle sonde permettant de mesurer sans extrapoler la pression limite pressiométrique des sols

A new probe for measuring the pressuremeter limit pressure of soils without extrapolation

Jacquard C., Rispal M.  
*Fondasol, Avignon, France*

Puech A., Geisler J., Durand F.  
*Fugro GeoConsulting, Nanterre, France*

Cour F.  
*Calyf, Maisons Lafitte, France*

Burlon S., Reiffsteck P  
*IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France*

**RÉSUMÉ:** Une limite actuelle des essais pressiométriques de type Ménard est liée à la difficulté d'atteindre des volumes d'expansion et des pressions importants sans risque systématique d'éclatement. Une nouvelle sonde a été développée qui permet d'atteindre, même sous pressions élevées, le doublement du volume du trou et donc la mesure directe de la pression limite conventionnelle du sol. On décrit les innovations technologiques qui ont conduit à accroître les performances et la fiabilité des sondes. On présente ensuite des essais comparatifs sur différents sites montrant les apports techniques et opérationnels du nouveau concept.

**ABSTRACT:** A present limitation of Menard type pressuremeter tests is due to the difficulty of reaching large expansion volumes and high pressures without exposing to significant risks of bursting. A new probe has been developed allowing the volume of the hole to be doubled, even under high pressures: the conventional limit pressure can then be directly measured. Technological innovations increasing the capabilities and reliability of pressuremeter probes are described. Comparative tests on different sites are presented demonstrating the technical and operational contribution of the new concept.

**MOTS-CLÉS :** essai pressiométrique Menard, sonde, mesure, membrane  
**KEYWORDS:** Menard pressuremeter test, probe, measurement, membrane

## 1. INTRODUCTION

La quasi-totalité des essais pressiométriques réalisés à partir de sondes de type Ménard sont arrêtés avant d'atteindre la pression limite du sol, définie comme la pression correspondant au doublement du volume initial du trou (normes NFP 94-110). Les tentatives pour atteindre cette pression limite avec les matériels couramment utilisés se soldent très fréquemment par l'éclatement de la sonde. Cette situation n'est évidemment pas satisfaisante et a conduit à rechercher des améliorations (Cour et al., 2005).

L'article présente les caractéristiques et les performances de la sonde pressiométrique Francis Cour (en abrégé sonde FC) conçue de manière à atteindre quasi systématiquement le doublement du volume de la cavité sans éclatement et pour des niveaux de pression nettement supérieurs à ceux tolérés par les sondes standard.

Des essais comparatifs menés dans différentes formations, avec des matériels standards et avec la sonde FC, illustrent les capacités de la sonde et ses performances opérationnelles.

## 2. SONDE PRESSIOMÉTRIQUE FRANCIS COUR

La sonde pressiométrique FC est, selon la norme NF P94-110-1, une sonde du type G à gaine souple. La longueur de la cellule centrale est de 210mm ; celle des deux cellules de garde est de 105mm. Les cellules ont un diamètre extérieur de 58 mm. La principale originalité de la sonde réside dans l'adjonction, autour de la gaine extérieure en élastomère, d'une gaine textile de contention qui a fait l'objet d'un brevet déposé en 2006 par Francis Cour. Cette gaine, de forme cylindrique au repos (Figure 1b), a la propriété de se dilater en opposant une très faible résistance, jusqu'à atteindre un

profil limite à partir duquel elle oppose une résistance très élevée à toute dilatation complémentaire. Dans le cas de la sonde pressiométrique, ce profil limite, en forme de fuseau, correspond à un volume d'injection de 1100 cm<sup>3</sup> dans la cellule centrale (Figure 1b).

Un dispositif similaire de gaine textile de contention a été mis en application pour la membrane de la cellule centrale (résistance propre  $p_m = 30$  kPa). La cellule, munie de ce dispositif présente une section parfaitement cylindrique sur l'ensemble de sa plage d'injection, jusqu'à un volume de 1100cm<sup>3</sup> (Figure 1a) tout en présentant une faible résistance propre.

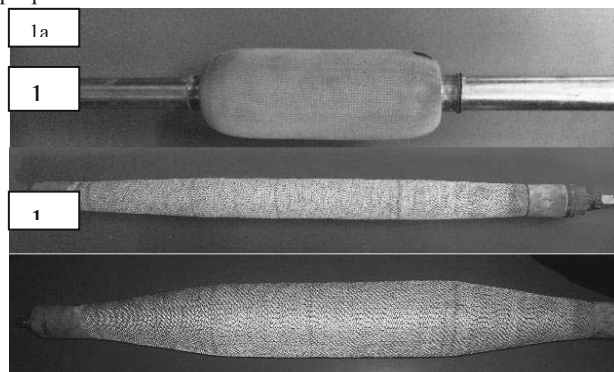


Figure 1. Vues de la membrane centrale gonflée à 1100 cm<sup>3</sup> (1a), de la gaine de contention non gonflée (1b) et gonflée à 1100 cm<sup>3</sup> (1c)

La nouvelle sonde pressiométrique est au final composée de la membrane de la cellule centrale et de la gaine décrites ci-dessus, recouvertes d'une sur-gaine en polyuréthane et de lamelles métalliques (Figure 2).

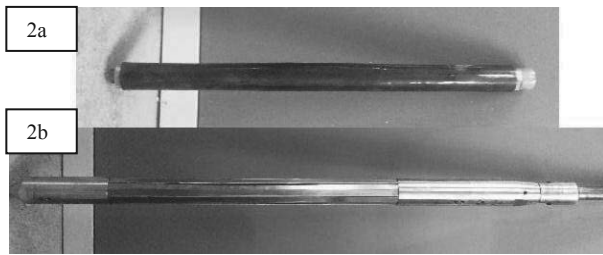


Figure 2. Sur-gaine (2a) et lamelles métalliques (2b) constituant la sonde FC.

Les propriétés particulières de la sonde en termes de capacité de gonflement en volume et pression, et de robustesse, sont illustrées par le diagramme d'étalonnage de la sonde, à l'air libre, poussé à 6 MPa (Figure 3).

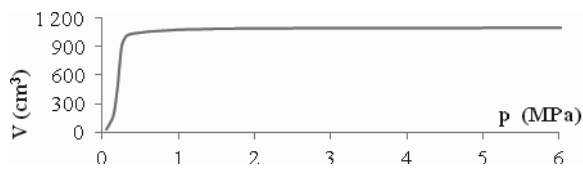


Figure 3. Courbe d'étalonnage de la sonde FC, menée à 6 MPa.

### 3. ESSAIS COMPARATIFS

Des essais comparatifs ont été menés d'une part avec une sonde FC, d'autre part avec une sonde classiquement utilisée par la profession sur plusieurs sites. Le mode opératoire a été identique pour chaque sonde, et a respecté les critères de la norme NF P94-110-1.

Le tableau 1 présente les caractéristiques d'étalonnage et de calibrage réalisés sur les quatre chantiers présentés par la suite. On note que la sonde FC vérifie bien les critères de la norme NF P94-110-1 d'une sonde à gaine souple.

Tableau 1. Caractéristiques de la sonde FC et du système CPV-tubulaires.

SN: sonde nue ; TF: Tube fendu ; Vs, p<sub>e1</sub> selon NF P 94-110-1

|                                      | Merville |      | Dunkerque |      | Grand Paris |      | Londres |
|--------------------------------------|----------|------|-----------|------|-------------|------|---------|
|                                      | FC       | SN   | FC        | SN   | FC          | TF   | FC      |
| V <sub>s</sub> [cm <sup>3</sup> ]    | 522      | 484  | 595       | 475  | 553         | 510  | 483     |
| p <sub>e1</sub> [MN/m <sup>2</sup> ] | 0.27     | 0.17 | 0.41      | 0.34 | 0.32        | 0.39 | 0.35    |

#### 3.1 Argile des Flandres (Merville)

L'argile surconsolidée des Flandres est un sol bien connu, particulièrement homogène sur le site expérimental de Merville. On dispose de nombreux sondages pressiométriques et pénétrométriques (Puech et al., 2013). On a réalisé à titre comparatif deux forages espacés de 5m réalisés à la tarière simple Ø63mm à sec, tubés en tête et par passes de forage de 3m. Pour les deux sondes, les conditions opératoires sont identiques: i) pression différentielle (pr+ph)-pk voisine de 0.14MPa, ii) 30m de tubulaires coaxiales Ø=3mm, iii) eau pure. Pour la mesure de grands volumes, la sonde FC a été couplée à un CPV piloté PREVO (Jean Lutz S.A.).

Les résultats sont donnés dans le tableau 2. Les valeurs de PI\* pour la sonde nue (SN) ont été calculées par extrapolation conformément à la norme NF P94-110-1 car le doublement de la cavité ( $V_L = V_S + 2V_1$ ) n'a pas été atteint (sauf essais à 7, 10 et 11m). Les valeurs en gras sont obtenues par interpolation linéaire sur les points mesurés. La valeur de PI\* est toujours mesurée directement avec la sonde FC comme illustré sur le Figure 4 pour l'essai à 12m.

Tableau 2 : Essais comparatifs dans l'argile des Flandres

| Profondeur | SONDE SN       |                    |             | SONDE FC           |                |             |
|------------|----------------|--------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|
|            | V <sub>L</sub> | E <sub>M</sub>     | PI*         | V <sub>L</sub>     | E <sub>M</sub> | PI*         |
|            | [m]            | [cm <sup>3</sup> ] | [MPa]       | [cm <sup>3</sup> ] | [MPa]          | [MPa]       |
| 6          | 668            | 11.5               | 0.96        | 680                | 8.1            | <b>0.99</b> |
| 7          | 686            | 12.5               | <b>1.02</b> | 712                | 9.4            | <b>1.01</b> |
| 8          | 782            | 15.3               | 1.15        | 688                | 13.1           | <b>1.28</b> |
| 9          | 742            | 16.5               | 1.24        | 716                | 10.3           | <b>1.29</b> |
| 10         | 656            | 15.6               | <b>1.32</b> | 699                | 14.3           | <b>1.62</b> |
| 11         | 620            | 14.0               | <b>1.33</b> | 719                | 13.0           | <b>1.67</b> |
| 12         | 720            | 19.7               | 1.45        | 763                | 11.2           | <b>1.68</b> |

On constate que :

- entre 6 et 9 m les valeurs de pression limite sont en bon accord ; au-delà les valeurs obtenues par la sonde FC sont légèrement supérieures mais restent dans la limite des variations locales indiquées par les essais au CPT électrique réalisés à proximité immédiate (Figure 5) ;
- les modules pressiométriques mesurés à la sonde FC sont un peu plus faibles ( $E_{M,FC} / E_{M,SN} \sim 0.75$ ) ;
- les rapports  $E_M/PI^*$  sont en conséquence plus faibles avec la sonde FC ( $E_M/PI^* \sim 8.5$ ) qu'avec la sonde SN ( $E_M/PI^* \sim 12.5$ )

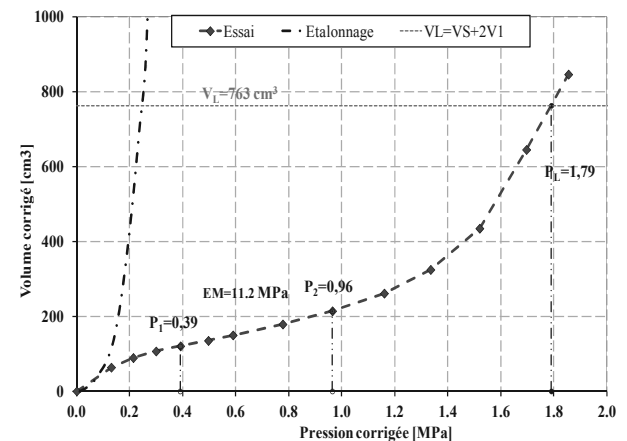


Figure 4 : Essai avec sonde FC dans l'argile des Flandres (-12m)

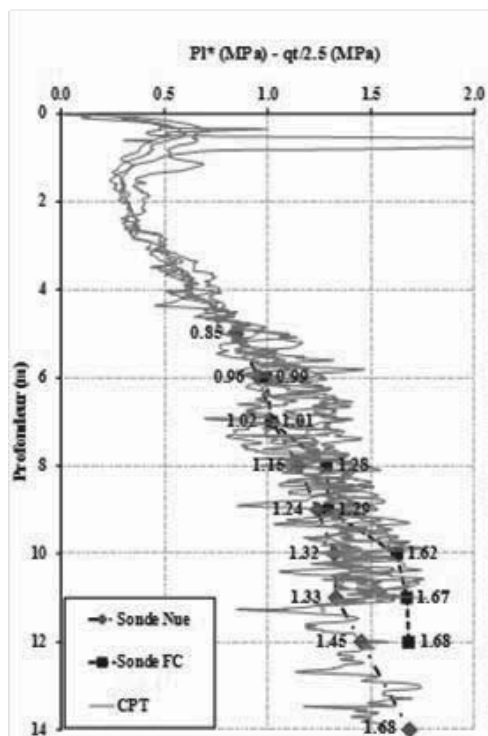


Figure 5 : Résultats comparatifs des essais PMT et CPT à Merville

### 3.2 Sables de Dunkerque

Sur ce site correspondant à un chantier de production classique, la sonde FC a été utilisée dans les mêmes conditions de forage au bilame sous boue, et avec les mêmes critères d'arrêt que la sonde nue SN, soit trois points après le fluage. Une analyse statistique des valeurs mesurées a été menée : elle a concerné 11 sondages au total (5 SN et 6 FC). Les valeurs ont été regroupées selon 3 classes de sable (1a : sables moyennement compacts, 1b : sables compacts, 1c : sables très compacts). Le tableau 3 montre que pour une mise en œuvre identique les résultats avec les deux types de sonde sont équivalents pour un total de 191 essais analysés.

 Tableau 3. Valeurs pressiométriques comparées (site de Dunkerque)  
 $E_M$  et  $P_l^*$  en MPa.

|    | Sonde FC   |       | Sonde standard SN |           |       | Ratios FC/SN |                   |                       |
|----|------------|-------|-------------------|-----------|-------|--------------|-------------------|-----------------------|
|    | 108 essais | $E_M$ | $P_l^*$           | 83 essais | $E_M$ | $P_l^*$      | $E_{MFC}/E_{MSN}$ | $p_{lFC}^*/p_{lSN}^*$ |
| 1a | 38         | 10.2  | 1.5               | 23        | 11.4  | 1.5          | 0.90              | 0.97                  |
| 1b | 25         | 23.8  | 3.3               | 32        | 21.5  | 2.9          | 1.11              | 1.17                  |
| 1c | 45         | 36.3  | 4.8               | 28        | 37.5  | 4.7          | 0.97              | 1.02                  |

### 3.3 Région parisienne

Deux sondages pressiométriques ont été réalisés à 5m de distance sur un site de la région parisienne dans le cadre du chantier "Grand Paris". La sonde classique est de type G avec tube fendu (TF) et cellule courte de 44 mm. La coupe lithologique au droit des sondages est :

- 0-7m : alluvions anciennes : limons, sables et graves
- 7-10m : calcaires de St-Ouen
- 10-20m : sables de Beauchamp.

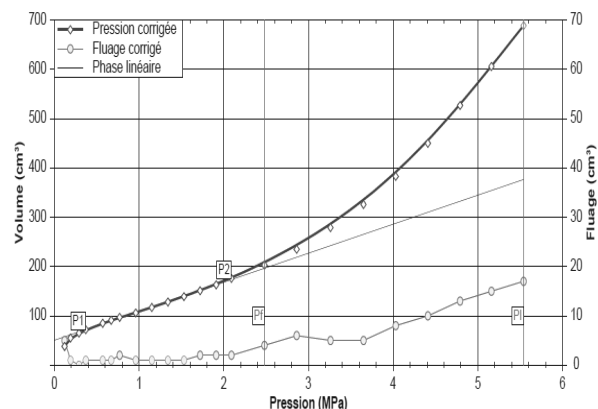


Figure 6. Essai avec la sonde FC dans les alluvions (-3.5m).

La figure 6 montre l'essai à 3.5m de profondeur dans les alluvions avec la sonde FC. Une expansion à 700 cm<sup>3</sup> a permis de mesurer directement la pression limite

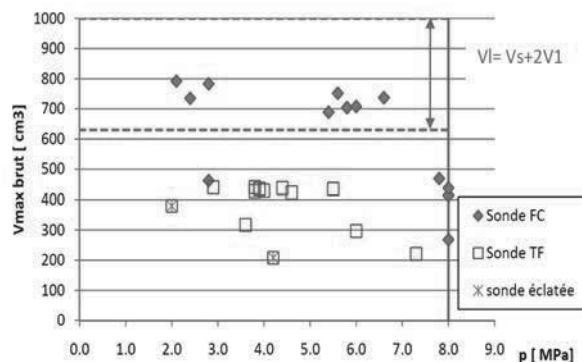


Figure 7. Sondages Grand Paris : pressions et volumes atteints pour chaque essai

Deux essais sur treize réalisés avec la sonde TF ont dû être arrêtés prématurément par éclatement de la membrane de sorte que les volumes injectés ont dû être limités à 440 cm<sup>3</sup> (Figure 7). Avec la sonde FC, aucun éclatement n'est à déplorer pour des essais menés jusqu'à 800 cm<sup>3</sup> (limite correspondant à la capacité du CPV utilisé), ou arrêtés à 8 MPa, critère d'arrêt fixé au cahier des charges (Tableau 4).

Tableau 4. Valeurs pressiométriques comparées (sondages Grand Paris)-

| Profondeur | Sonde FC              |                 |                   | Sonde TF          |                       |                 |               |
|------------|-----------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|---------------|
|            | VI [cm <sup>3</sup> ] | $E_{MFC}$ [MPa] | $p_{lFC}^*$ [MPa] | $p_{lFC}^*$ [MPa] | VI [cm <sup>3</sup> ] | $E_{MTF}$ [MPa] | $p_l^*$ [MPa] |
| 3.5        | 697                   | 30              | 5.5               | 4.3               | 750                   | 74              | 4.5           |
| 5.0        | 667                   | 41              | 6.3               | 4.8               | 970                   | 36              | 5.9           |
| 6.5        | 931                   | 61              | 10.7              | 10.0              | 1030                  | 36              | >3.5          |
| 7.9        | 839                   | 30              | 2.8               | >1.8              | 970                   | 19              | >1.7          |
| 11.0       | 629                   | 102             | 8.4               | 8.0               | 730                   | 55              | 5.8           |
| 12.5       | 889                   | 105             | >7.8              | >5.3              | 710                   | 128             | >7.1          |
| 14.0       | 893                   | 47              | 5.3               | 5.1               | 710                   | 44              | 4.2           |
| 15.5       | 833                   | 13              | 2.1               | 2.0               | 730                   | 123             | >4.1          |
| 17.0       | -                     | 39              | 6.1               | 5.6               | 610                   | 69              | >4.2          |
| 18.5       | -                     | 152             | >7.8              | >7.8              | 710                   | 91              | 6.8           |
| 20.0       | 883                   | 66              | 5.8               | 4.8               | 610                   | 61              | 3.7           |

On constate pour les deux sondes, une concordance globale entre modules pressiométriques ( $E_{M,FC}/E_{M,TF} \sim 1.1$ ). En revanche le ratio  $pl^*_{FC}/pl^*_{TF}$  est de l'ordre de 1.3.

Si on reprend l'interprétation des essais FC (colonne  $pl^*_{FC3}$ ) en limitant l'extrapolation à trois points après P2 (ce qu'autorise la norme, et ce qui correspond à la façon dont sont traités la plupart des essais en France), on obtient des valeurs  $pl^*_{FC3}$  systématiquement inférieures d'environ 10% aux valeurs  $pl^*_{FC}$ . L'extrapolation limitée à 3 points conduit ainsi à une sous-estimation des pressions limites. Corrélativement les valeurs de  $E_M/pl^*$  se trouvent surestimées.

### 3.4 Essais haute pression

Des essais haute pression (12 MPa) avec la sonde FC ont été mis en œuvre entre 54 et 66m de profondeur, dans des sables fins très compacts de Londres (Thanétien). Les deux forages ont été réalisés au taillant en rotation 66 mm avec injection de boue et mise en place de tubage à l'avancement. Des essais haute pression avaient déjà été réalisés dans ces sables avec une sonde nue standard et du matériel adapté pour la circonstance (Massonnet, 2005). L'arrêt des essais à 12 MPa est dû aux limites du contrôleur pression-volume et non pas à la sonde qui a permis de mesurer des pressions limites élevées, sans aucun éclatement pour les 18 essais. La figure 8 montre un essai à 63m de profondeur avec 4 points au-delà de P<sub>2</sub>, ce qui autorise une extrapolation réaliste de la pression limite ( $pl^* = 13$  MPa;  $E_M = 112$  MPa, pour un volume brut  $V_{max} = 450$  cm<sup>3</sup>;  $V_{max, net} = 409$  cm<sup>3</sup>).

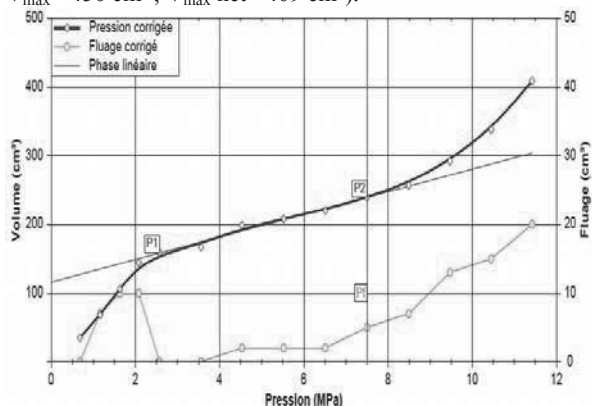


Figure 8. Essai avec la sonde FC dans les sables du Thanétien (-63m).

## 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La sonde FC constitue une avancée technologique significative dans la mesure des paramètres pressiométriques des sols. La conception originale de sa membrane autorise dans la grande majorité des cas la mesure directe de la pression limite par doublement effectif du volume de la cavité.

Sa remarquable résistance à l'éclatement y compris sous pression élevée permet son emploi dans des terrains hétérogènes et résistants, correspondant au domaine d'utilisation habituel du tube fendu, et autorise ainsi sur les chantiers des cadences accrues.

La sonde est conforme aux exigences de la norme NFP 94-110-1 pour une sonde à gaine souple. Dans des conditions opérationnelles similaires, la sonde FC et une sonde nue standard (SN) fournissent des paramètres pressiométriques équivalents. Les exemples traités montrent que l'extrapolation de données obtenues avec des sondes standard à trop faible capacité d'expansion peut conduire à une sous-estimation des pressions limites.

La généralisation de ce type de sonde passe par une amélioration des matériels existants notamment en ce qui concerne la capacité en volume et pression des contrôleurs pression – volume.

## 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la société Jean Lutz S.A. pour la mise à disposition gracieuse de son matériel et son assistance sur les chantiers expérimentaux de Fugro et de Fondasol.

## 6. REFERENCES

- AFNOR. 2000. Norme NF P94-110-1. Essai pressiométrique Ménard.
- Cour F., Puech A., Durand F. 2005. Un pressiomètre de nouvelle génération. 2005. *Proc. ISP5-PRESSIO* (1), 63-73
- Massonnet R. 2005. Le pressiomètre sous haute pression. *Proc. ISP5-PRESSIO* (1), 81-90
- Puech A. et Benzaria O. 2013. Effet du mode de mise en place sur le comportement statique de pieux dans l'argile fortement surconsolidée des Flandres. *Proc. 18 ICSMGE*, Paris